

洪水時の河川堤防における盤ぶくれ現象に関する遠心模型実験

Centrifuge model tests on heaving phenomenon in the levee during flooding

増田 雄太[†], 奥村 哲夫^{††}, 成田 国朝^{††}

Yuta Masuda, Tetsuo Okumura, Kunitomo Narita

Abstract Centrifuge model tests were made to find out the most effective installation distance of the vertical drains and to examine the influence on heaving damage of the thickness of the impermeable surface layer and the increasing rate of water level. The results revealed that the impermeable layer shows a greater expansion according as the drain distance becomes wider, which leads to higher pressure head in the layer by lowering the influence of drains. The tendency usually observed in the expansion increase of the impermeable layer with the decrease of its thickness was not confirmed in the tests. Also noticed was that the increasing rate of water level has little effects on the heaving process. It was then concluded that the heaving phenomenon is largely dependent on the drain distance and gives a significant influence on the stability of the permeable base foundation overlaid by the impermeable layer.

1. はじめに

堤防はあらゆる治水施設のうち最も重要な防災構造物である。難透水性基礎地盤上の河川堤防では、洪水時に水位の上昇によって、川裏法尻近傍で揚圧力が発生し、難透水性地盤が持ち上げられる、いわゆる盤ぶくれによる破壊が起こると考えられ、その対策として鉛直ドレーンの設置が有効であるとされている。しかし、河川堤防に沿って連続的にドレーンを設置することは施工時間がかかり、費用の面においても現実的ではない。

そこで本研究では、盤ぶくれの発生を抑制し最も効率のよい鉛直ドレーンの有効設置間隔を見出すこと、また難透水層厚さ、水位上昇速度を変化させた場合に盤ぶくれに及ぼす影響を調べることを目的として 3 次元遠心模型実験を行った。

2. 実験概要

2・1 実験装置

模型の概略図を図-1、計器の配置図を図-2 に示す。実験に使用した土槽は、内寸法は幅 540mm×奥行 410mm×高さ 375mm であり、堤体底面のどの位置においても遠心加速度が同一になるように円弧型のスペーサーが底面に設けてある。

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

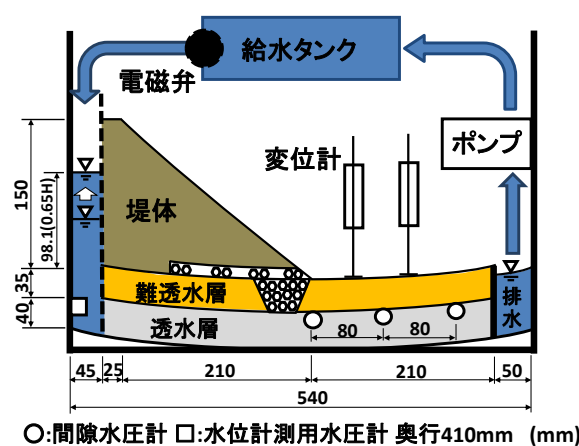


図-1 模型の概略図

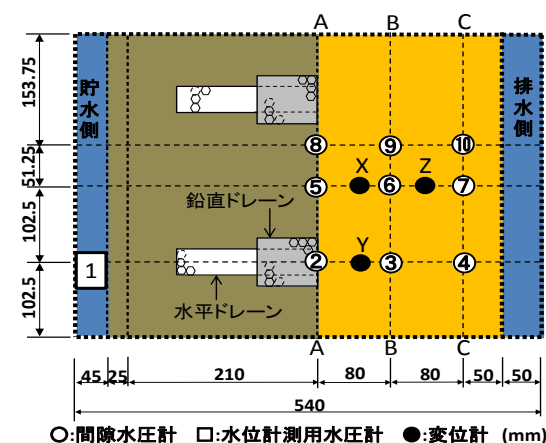


図-2 計器の配置図(一例)

2・2 試料

試料の物理的性質を表-1 に示す。本研究で使用した試料としては、堤体部には礫質砂、透水層には砂（珪砂 6 号）、難透水層には粘土、ドレーン材は礫（珪砂 1 号）を用いた。

表-1 試料の物理的性質

試料名	堤体 礫質砂	透水層 砂 (珪砂6号)	難透水層 粘土	ドレーン 礫 (珪砂1号)
最大粒径 d_{max} [mm]	5.00	0.85	2.00	5.00
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.653	2.646	2.641	2.629
最大乾燥密度 ρ_{dmax} [g/cm ³]	1.971	-	1.468	-
最適含水比 w_{opt} [%]	12.23	-	28.4	-
模型の締め固め密度 ρ_d [g/cm ³]	1.75	1.270(水締め)	1.068	1.511
締め固め D -値 [%]	91.0	-	72.8	-
模型の含水比 w [%]	9.25	-	43.9	-
透水係数 k [m/s]	6.50×10^{-7}	8.97×10^{-4}	4.00×10^{-4}	2.32×10^{-3}

2・3 モデル作製

基礎地盤は透水性地盤上に難透水性の土層が堆積した地盤とした。透水性基礎地盤(透水層、高さ 40mm)は砂(珪砂 6 号)を敷き詰め、水締めによって締め固めた。次に揚圧力を計測するために間隙水圧計を水締めした透水層の表面に埋設する。間隙水圧計は、遠心力を受けた際に沈下しないようにアルミ棒($\phi=0.4\text{mm}$ 、 $L=3.0\text{mm}$)を間隙水圧計の下に埋設しその上にのせる。難透水層を透水層上に高さ 35mm で粘土(高液性限界、含水比 43.9%)を敷き詰めて作製した。その後、鉛直ドレーンを堤体の法尻に設置する。ドレーン材は礫(珪砂 1 号)を詰めて作製する。堤体部(高さ $H=150\text{mm}$)には、礫質砂(含水比 9.25%, 締め固め密度 1.75g/cm^3)を 8 層に分けて締め固めるが、堤体内部に水平ドレーンを設置するので、1 層目を締め固めた後、水平ドレーン設置部分を掘削する。そこにフィルターを敷き、礫(珪砂 1 号)を詰め、残りの 7 層を順次締め固めていく。締め固めの後、勾配が 1:1.4 になるように掘削し模型を作製する。

2・4 ドレーンについて

ドレーンとは排水設備のことである。鉛直ドレーンは揚圧力を軽減するためのドレーンであり、水平ドレーンは堤体の浸潤面の上昇を抑制し堤体の破壊を防ぐためのドレーンである。本研究では堤体下の難透水層に上底面 1 辺 65mm の正方形、下底面 1 辺 30mm の正方形、高さ 35mm の錐台を掘削して鉛直ドレーンとした。ドレーン形状は図-3 に示す。

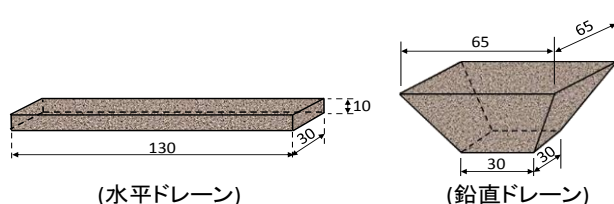


図-3 ドレーン形状

2・5 遠心载荷実験装置の概要

遠心模型実験は、実物の $1/n$ の模型を重力加速度の n 倍の遠心加速度の場において模型内に実物と同じ自重応力状態を再現しようとする手法である。模型が小さいことや、実験時間を短縮できることから、コストを下げ多くの実験を行うことができる。本研究では 30G を基本とし、実験を行った。遠心载荷模型実験以外の小型の縮尺模型実験では、土質材料の力学特性が拘束応力に依存するため、実物との相似性が問題となり有効ではない。また、 $1/n$ のスケールにすると毛細管現象の影響が大きくなり実際の浸潤面とは異なる浸潤面になってしまう。

2・6 遠心模型実験の手順

基礎部底面に対して 10G、20G、30G と遠心加速度を上げ、30G 一定となった後、圧密を行う(約 7 分 / 実物換算 4.4 日)。圧密沈下量に変化がなければ貯水を開始する。貯水は給水タンクに固定された電磁弁を操作し行う。水位が中間水位(目標 4.91cm)、高水位(目標 9.81cm)に達した時点で、自動で水位を調節し一定に保つ。そして、目標水位のもとで埋設した間隙水圧計の値が一定になったときを定常状態とみなし(約 8 分 / 実物換算 5 日)、遠心载荷装置を停止する。

3. ドレーン間隔と盤ぶくれの関係

3・1 実験ケース

水平ドレーンと鉛直ドレーンを 1 個設置した場合(実験 1-1)、2 個設置した場合(実験 1-2)、3 個設置した場合(実験 1-3)、4 個設置した場合(実験 1-4)、及び鉛直ドレーン無しの場合(実験 1-5)の 5 ケースについて行った。各実験のドレーン間隔をまとめたものを表-2 に示す。実験 1-1、1-2、1-3、1-5 は間隙水圧計①～⑩、変位計 X、Y を使用、実験 1-4 は計測機器の関係上⑨の間隙水圧計を無くし、変位計 Z を追加した。

表-2 各実験のドレーン間隔

実験	水平・鉛直ドレーン間隔 S (cm)	実物換算 (m)
1-1	40.0	12
1-2	20.0	6
1-3	13.3	4
1-4	10.3	3
1-5	鉛直ドレーン無し	

3・2 実験結果と考察

3・2・1 圧力水頭とドレーン間隔の関係

図-4 は中間水位と高水位の圧力水頭 h_p とドレーン間隔 S の関係を示したものである。中間水位ではどの断面

をみても $S=3\text{m}$, 4m , 6m , 12m の順におおよそ圧力水頭 h_p が高くなっていることが分かる。これはドレーン間隔が広くなるにつれてドレーンまでの距離が遠くなり、揚圧力が低減されないため圧力水頭 h_p が高くなったと考えられる。しかし、高水位ではどの断面においてもそのような傾向がみられず、 $S=6\text{m}$ よりも $S=4\text{m}$ の方が、圧力水頭 h_p が高くなっていることがわかる。 $S=6\text{m}$ で難透水層にクラックが入ったため圧力水頭 h_p が低くなったの

ではないかと考えられる。また、中間水位、高水位ともにドレーン中心線上に比べてドレーン間中央の圧力水頭 h_p が高いことが分かる。これは、ドレーンから離れることによりドレーンの影響が小さくなるため高くなったと考えられる。特に A-A 断面においては、顕著に現れている。これはドレーンに近い場合、ドレーンの影響が大きくなったのではないかと考えられる。

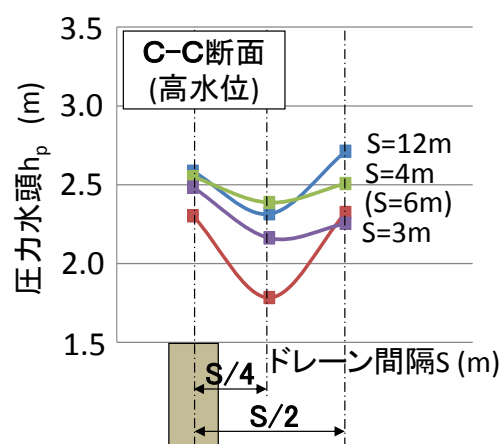
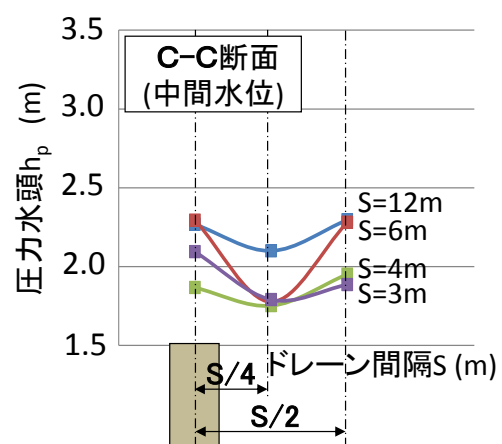
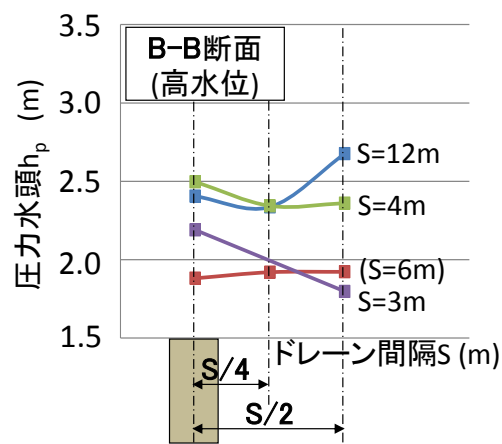
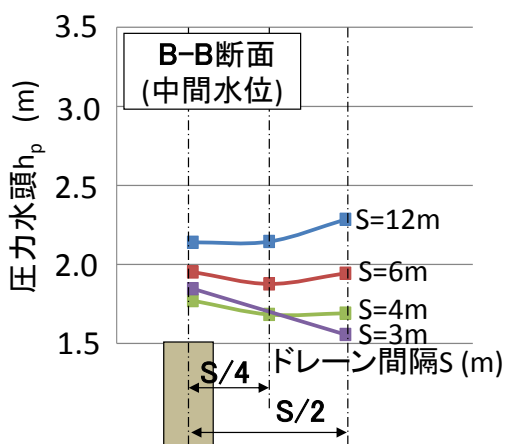
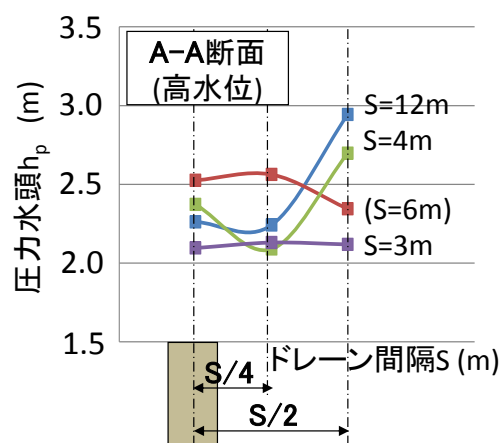
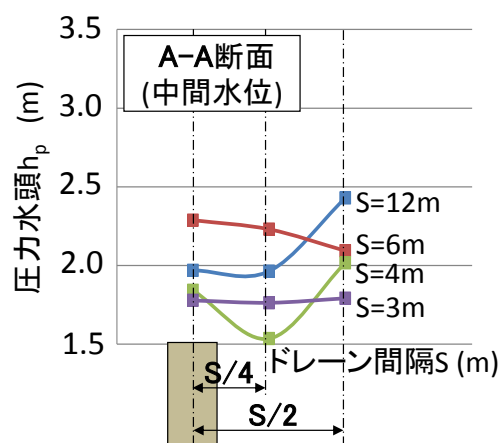


図-4 圧力水頭 h_p とドレーン間隔 S の関係 (ドレーン間の $1/2$ 平面)

3・2・2 膨張量とドレーン間隔の関係

図-5 は中間水位と高水位の膨張量とドレーン間隔 S の関係を示したものである。中間水位の $S=6\text{m}$ の時点でわずかに膨張しており、 $S=3\text{m}$, $S=4\text{m}$, $S=6\text{m}$, $S=12\text{m}$ の順に膨張量が増加していることが分かる。高水位においてもドレーン中心線上に設置した変位計(■印)は 0.4mm , 3.0mm , 34.0mm とドレーン間隔 S が広くなるにつれて膨張量が増加しており、特に $S=6\text{m}$ から $S=12\text{m}$ の間で膨張量が急激に増加している。これも同様にドレーンから離れることにより揚圧力が高まったためだと考えられる。しかし、高水位のドレーン無しでは、 $S=12\text{m}$ と比較すると膨張量が低くなっている。これは、難透水層の厚さが不均一になってしまった可能性が考えられる。また $S=6\text{m}$ のドレーン間中央においては、急激な膨張がみられクラックが入り、前述の $S=4\text{m}$ より圧力水頭 h_p が低い理由であると考えられる。

3・2・3 平均圧力水頭 h_p' と膨張量の関係

図-6 は中間水位と高水位の膨張量と変位計付近の間隙水圧を平均し求めた平均圧力水頭 h_p' の関係を示したものである。変位計 X に対し間隙水圧計の⑤, ⑥, Y に対し②, ③, Z に対し⑥, ⑦の間隙水圧を平均した。中間水位時には本研究では安全率(=難透水層の有効土被り圧/揚圧力)が 1.0 となる圧力水頭 h_p は 1.75m であるが、中間水位、高水位ともに $h_p' \approx 2.0\text{m}$ 付近(安全率 ≈ 0.89)から若干ではあるが膨張し始め、さらに圧力水頭が高くなると大きく膨張していることが見てとれる。

3・2・4 安全率と膨張量の関係

図-7 は中間水位と高水位の安全率と膨張量の関係を示したものである。安全率に用いた揚圧力は平均圧力水頭 h_p' の求め方と同じである。中間水位時には安全率が低くなるにつれて膨張量が高くなっていることがわかる。これは安全率が低いものはドレーンまでの距離が遠いため、ドレーンの効果が薄まり透水層内の揚圧力が高くなる。それにより膨張量が高く出たのではないかと考えられる。高水位時には、多少のばらつきはあるものの中間水位時と同様に安全率が低くなると膨張量が高くなっていることがわかる。また、中間水位時よりもドレーンから離れているドレーン間中央や、ドレーン無しの安全率が低いことがわかるが、膨張量に関しては低い値を示している。これはモデルの精度の問題であると考えられる。

4. 難透水層の厚さと盤ぶくれの関係

4・1 実験ケース

各実験の難透水層厚さを表-3 に示す。難透水層厚さ 35mm (実験 1-2)を基準に 30mm にした場合(実験 2-1)、 40mm にした場合(実験 2-2)の 3 ケースで実験結果の比較を行った。実験 2-1,2-2 は計測機器の関係上⑨の間隙水圧

計を無くし、変位計 Z を追加した。

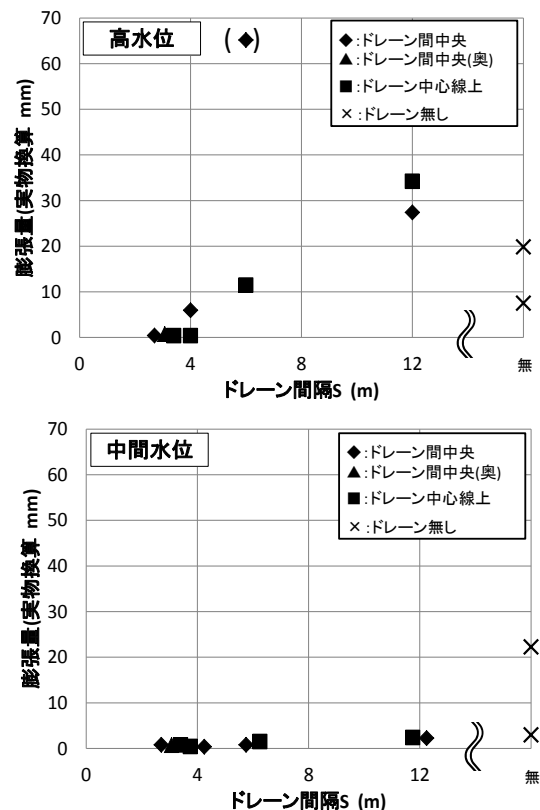


図-5 膨張量とドレーン間隔 S の関係

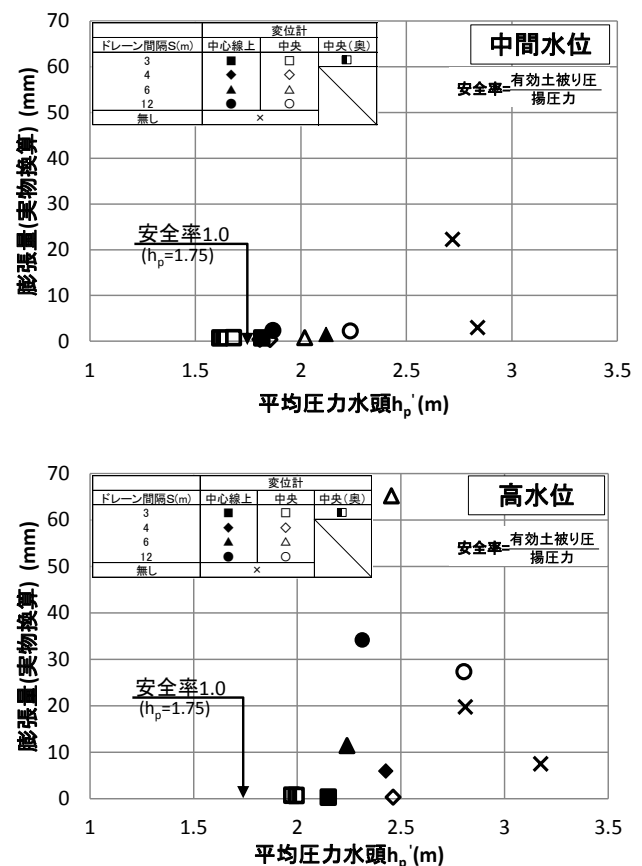


図-6 平均圧力水頭 h_p' と膨張量の関係

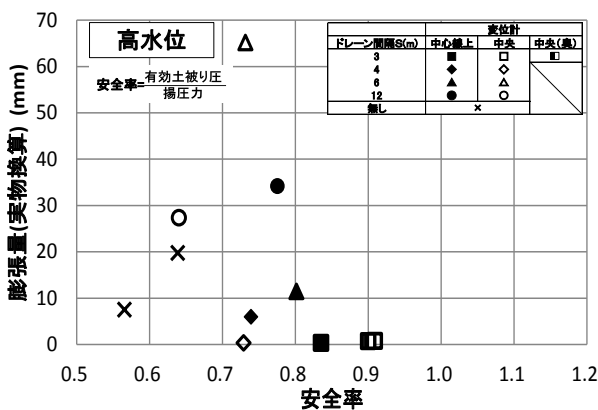
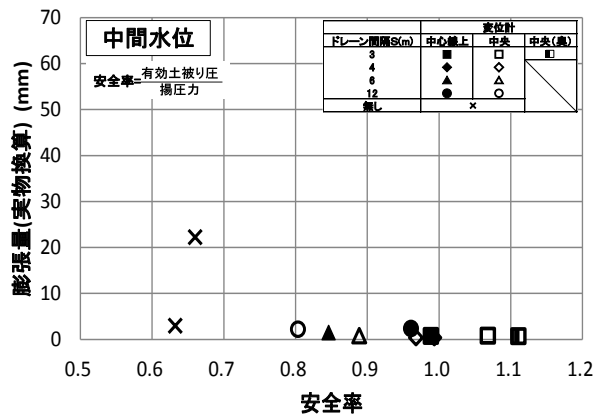


図-7 安全率と膨張量の関係

表-3 各実験の難透水層厚さ

実験	難透水層厚さ (mm)	実物換算 (m)
2-1	30	9.00
1-2	35	1.05
2-2	40	1.20

4・2 実験結果と考察

4・2・1 難透水層厚さと膨張量の関係

図-8は難透水層厚さと膨張量の関係を示したものである。中間水位は、どの厚さにおいても目立った膨張はない。高水位は、難透水層の厚さが 35mm, 40mm は膨張しているのが確認できるが、30mm はほとんど膨張していないことがわかる。予想される結果としては、難透水層厚さが薄いほど、有効土被り圧が小さいため膨張量が増加すると考えられるが、今回の実験結果からはそのような通常の傾向は見られなかった。

4・2・2 ドレーンからの距離と安全率

図-9はドレーンからの距離と安全率の関係を示したものである。ドレーンからの距離は最もドレーンに近い間

隙水圧計②を基準に距離を算出したものである。予想される結果としてはドレーンからの距離が遠いほど安全率も高くであるであろうと思われたが、中間水位、高水位ともにそのような傾向は得られなかった。また、難透水層厚さをみると、中間水位時にはおおよそではあるが厚さが薄くなるにつれて安全率も低くなっていることがわかる。これについても同様に薄くなるほど有効土被り圧が小さくなるためであると考えられる。しかし、高水位については 35mm より 40mm のほうが全体的に安全率は低くみえる。これに関しては前述の通り、厚さ 35mm の基準にした実験において急激な膨張によりクラックが入ってしまったためだと思われる。中間水位、高水位どちらについてもいえることは厚さが 30mm のケースは全体的に最も安全率が低いことである。

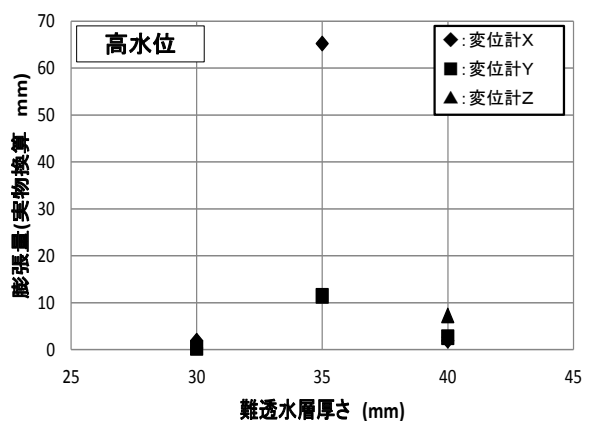
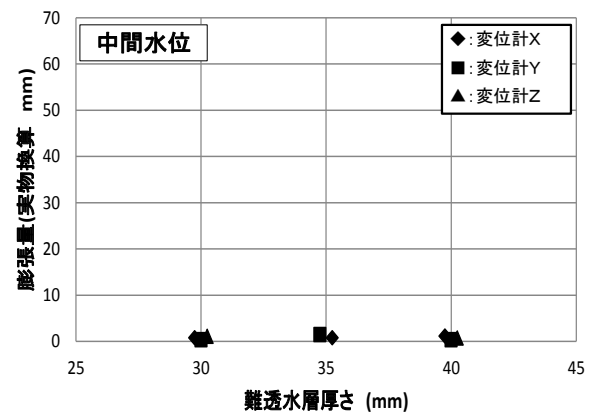


図-8 難透水層厚さと膨張量の関係

4・2・3 安全率と膨張量の関係

図-10 は安全率と膨張量の関係を示したものである。予想される結果としては安全率が低くなるほど膨張量が高くなるものと思われたが、難透水層厚さと膨張量の関係と同様に中間水位にはほとんど膨張せず、高水位においては、全体的に安全率の低いにも関わらず難透水層の厚さが 30mm のケースは膨張せず、30mm に比べて比較的安全率の高い 35mm や 40mm が膨張しているため、予想した傾向は得ることができなかった。このことから、

模型作製の際、難透水層や鉛直ドレーンの精度に原因があったのではないかとされる。

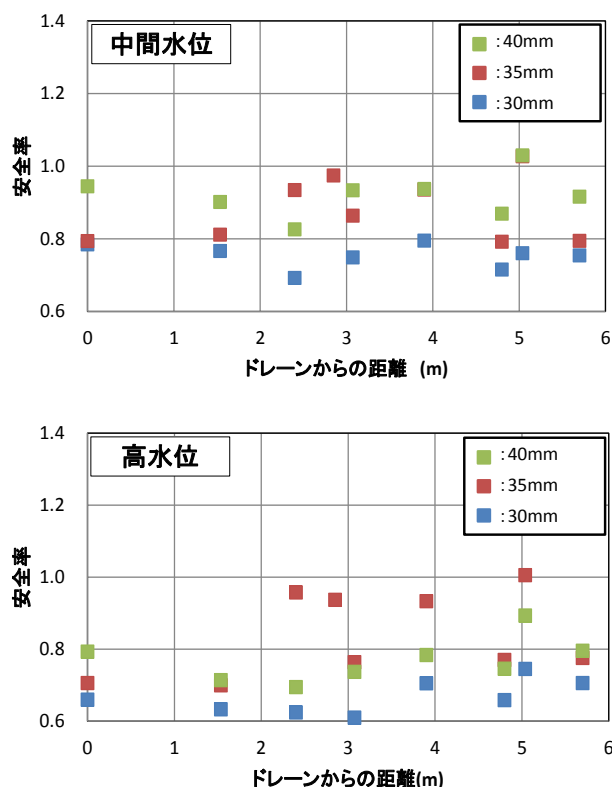


図-9 ドレーンからの距離と安全率の関係

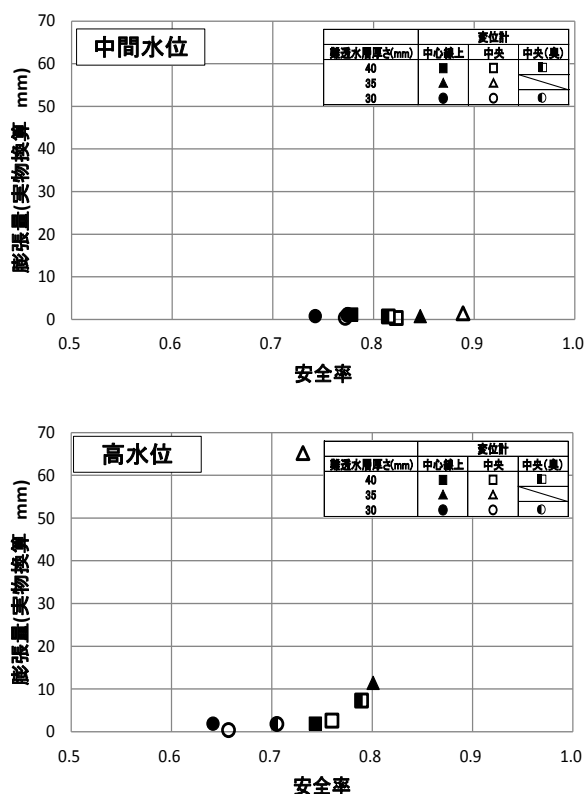


図-10 安全率と膨張量の関係

5. 水位上昇速度と盤ぶくれの関係

5・1 実験ケース

各実験の水位上昇速度を表-4 に示す。中間水位の水位上昇速度は 0.57m/時、高水位は 0.27 m/時にした場合(実験 1-2)、0.05m/時、0.02 m/時にした場合(実験 3-1)、0.44 m/時、0.12 m/時にした場合(実験 3-2)の 3 ケースで実験結果の比較を行った。実験 3-1,3-2 は計測機器の関係上⑨の間隙水圧計を無くし、変位計 Z を追加した。

表-4 各実験の水位上昇速度

実験	水位上昇速度 (実物換算m/時)	
	中間水位	高水位
3-1	0.05	0.02
3-2	0.44	0.12
1-2	0.57	0.23

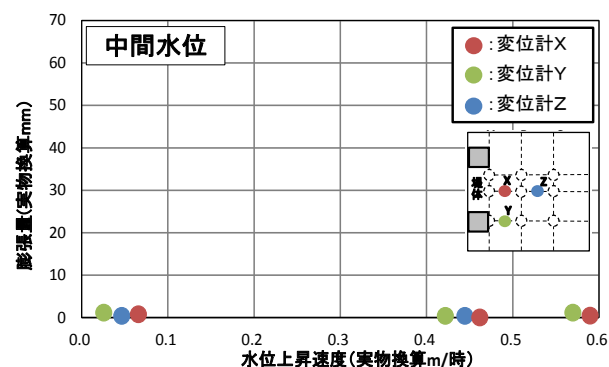
5・2 水位上昇速度について

水位上昇速度の設定は、決められた速度で水位を操作することが困難なため、それぞれ水を流す電磁弁の径の大きさを変え、実験結果より上昇速度を求める方法を取った。上昇速度の求め方は、水位計測用水圧計①より得られた貯水圧を圧力水頭に変換する。また貯水開始から中間水位、高水位で一定の値になるまでの時間を求める。その後、一定になった圧力水頭を求めた時間で割り上昇速度を求める。計算の際、誤差が大きいため、5 秒ごとで区切り誤差を小さくし、それを平均した値を水位上昇速度とした。

5・3 実験結果と考察

5・3・1 水位上昇速度と膨張量の関係

図-11 は中間水位と高水位の水位上昇速度と膨張量の関係を示したものである。



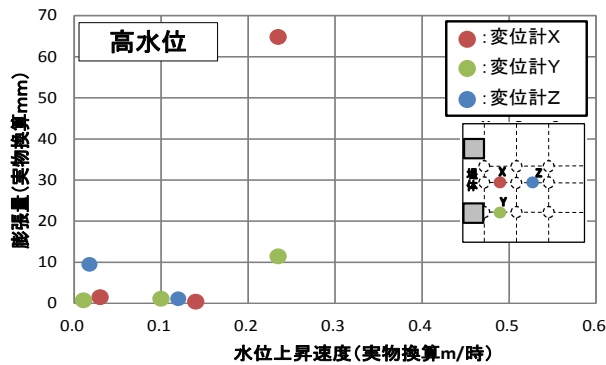


図-11 水位上昇速度と膨張量の関係

中間水位ではどの上昇速度であっても膨張はほとんど発生していない。高水位では、基準である実験 1-2 の変位計 X を除き、最も上昇速度の大きい場合と小さい場合を比較しても、すべて膨張量は実物換算で約 11mm 以下となっている。この結果から水位上昇速度と盤ぶくれとの間に関係が無い可能性がある。

5・3・2 水位上昇速度と圧力水頭の関係

図-12 は水位上昇速度と圧力水頭の関係を示したものである。中間水位時を見てみると、おおよそではあるが水位上昇速度に関わらず同じような圧力水頭である。高水位時においても、おおよそ同様に圧力水頭は速度によって変わらないと思われる。このことから、圧力水頭の観点から見ても水位上昇速度によって盤ぶくれに与える影響は小さいのではないと思われる。盤ぶくれに大きな影響を与える要因としては、やはり河川の水位や難透水層の状態ではないか。

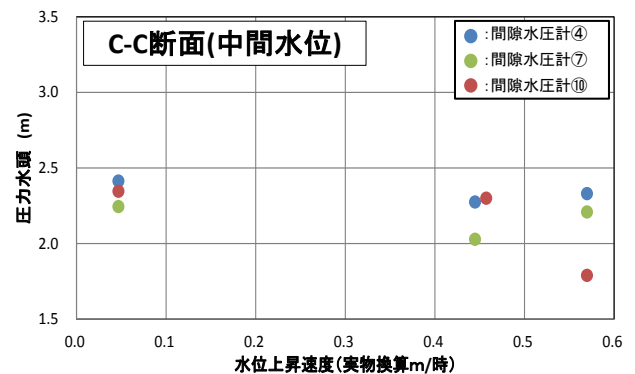
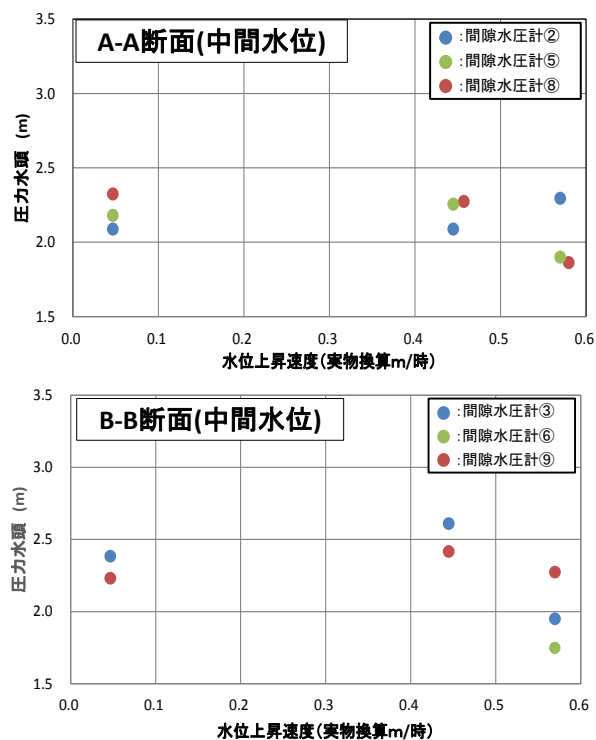


図-12 水位上昇速度と圧力水頭の関係(中間水位)

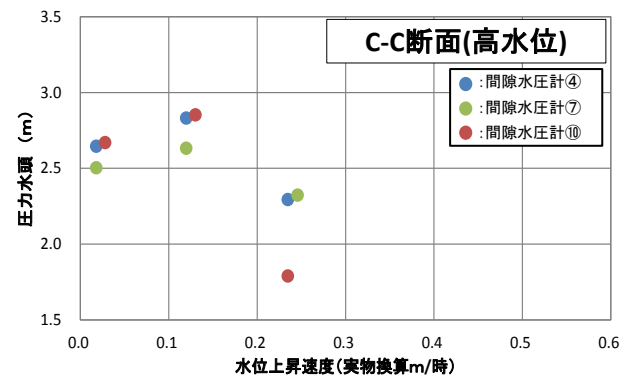
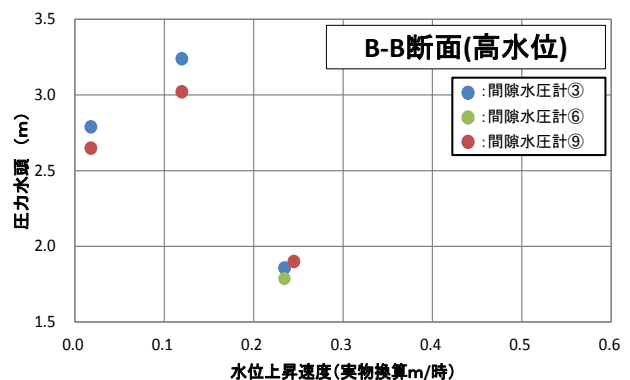
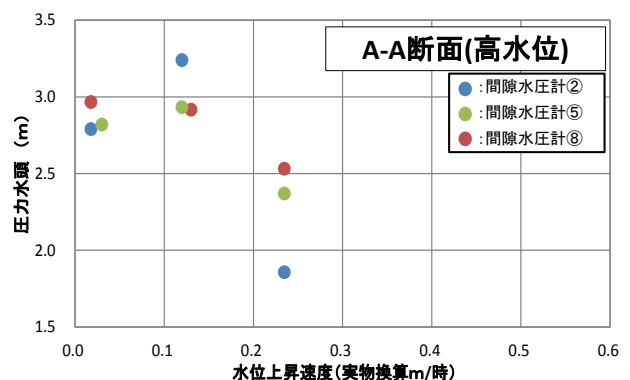


図-13 水位上昇速度と圧力水頭の関係(高水位)

6. まとめ

3 次元の遠心載荷模型実験を行い、実験結果から以下のことが確認された。

- 1) ドレーンの有効設置間隔については、ドレーンから離れることにより圧力水頭が高くなる傾向がみられる。また、ドレーン付近では設置間隔に関わらず、ドレーンの影響が顕著に現れる。またドレーンの間隔が広くなるにつれて盤ぶくれが発生しやすくなり、膨張量も高くなる。図-5 の結果から規定された膨張量に対する有効なドレーン間隔の決定に用いることができる。今回の結果では圧力水頭が約 2.0m から膨張し始めることが確認された。しかし材料特性の影響を受けるため、さらに実験を重ね一般化する必要がある。安全率が低くなるとおおよそ膨張量も高くなる。
- 2) 難透水層厚さと盤ぶくれの関係は、難透水層厚さが薄くなるほど膨張量が大きくなるという予想されたが、今回の結果においてはそのような傾向にならなかった。また厚さが薄くなるほど安全率が低くなるという傾向は得られたが、安全率が低くても膨張しないケースが多かった。
- 3) 水位上昇速度と盤ぶくれの関係は、中間水位、高水

位ともに、速度に関わらず約 11mm 以下の膨張量がほとんどであった。また圧力水頭の観点からみても、上昇速度に関わらず同じような値が得られた。この結果から水位上昇速度と盤ぶくれの関係はないと判断される。しかし、今回の実験では水位上昇速度の設定が現実とかけ離れていたため、今後の検討課題として残された。

＜参考文献＞

- 1) 木部淳, 森川浩孝: 河川堤防の揚圧力対策に関する遠心模型実験, 平成 24 年度 愛知工業大学工学部 都市環境学科 地盤研究室 卒業論文集 (2013)
- 2) 望月隆義: 河川堤防の揚圧力対策としてのドレーンの有効間隔について, 平成 24 年度 愛知工業大学工学部 都市環境学科 地盤研究室 卒業論文集 (2013)
- 3) 奥村哲夫: AIT 遠心載荷装置の概要 (1994. 3)
- 4) 奥村哲夫・木村勝行・成田国朝・中村吉男: 河川堤防の揚圧力対策に関する 3 次元遠心模型実験, 土木学会第 68 回年次学術講習会 (2013)

(受理 平成 28 年 3 月 19 日)